

# 個別要素法を用いた大破した建築物の一時的安定化対策の試み

## Experiment of Temporary Stabilization of Severely Damaged Buildings Using Distinct Element Method

○堀口俊行<sup>1</sup>, 濱本卓司<sup>2</sup>, 矢代晴実<sup>1</sup>, 喜納 啓<sup>3</sup>  
Toshiyuki Horiguchi<sup>1</sup>, Takuji Hamamoto<sup>2</sup>,  
Hayumi Yashiro<sup>1</sup>, and Satoshi Kina<sup>3</sup>

<sup>1</sup>防衛大学校 建設環境工学科

Department of Civil Engineering, National Defense Academy

<sup>2</sup>東京都市大学 名誉教授

Emeritus Prof., Tokyo City University

<sup>3</sup>横浜国立大学 イノベーション学府建築都市文化専攻

Department of Urban Innovation, Yokohama National University

This paper presents computational approaches on RC structure model of two story 1 span using distinct element method (so called DEM). First, The outline of DEM is explained, and the suggestion method initially is indicated that its connect spring and contact spring have different functions. If an object comes in contact in case of contact spring, the spring between elements is set. on the other hand, the combination of elements between which the spring is set is specified beforehand for a connect spring. Second, the utility of tension member is examined as stiffening member of collapsed structure. Therefore, In addition, utility as simple emergency stabilization countermeasure is tried.

**Keywords** : RC structure, Temporary stabilization, tension member, distinct element method, collapse process

### 1. 緒言

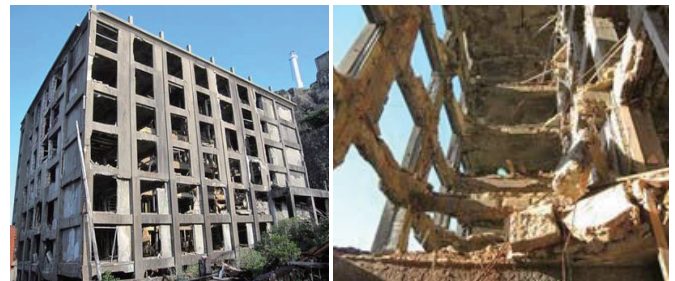
南海トラフ巨大地震や首都直下地震、あるいは爆発・衝突を手段とするテロ活動が発生すると、耐震設計された建物といえども崩壊の危険に晒されるものと考えられる。しかし、崩壊を免れた建物の中にも部分的な破壊が進行し、崩壊の危機の中で避難行動や救援活動を強いられることも少なくない。実際、地震において生命維持を第一に考えると、早急に救出・捜索が必要であり、崩壊が予想された建物において救出活動が求められる。このような状況で、避難行動や救援活動を安心して進めることができる崩壊回避応急安定化対策の開発は重要な課題である。例えば、写真-1は台風が通過後に崩壊したRC構造物である。このように老朽化したRC構造物は、自然災害の影響で崩壊に至っており、二次災害を防ぐために一時的に構造物の安定化を図る対策が求められている。

そこで本研究では、個別要素法を用いて高さ6.4mの2層1スパンのRC構造物の骨組みをモデル化した解析を基に、崩壊構造物に引張材を有することの効果を検討するものである。その際、引張材は補強ケーブルを建物の外壁にかけるもので、簡易的な応急安定化対策としての有用性を試みている。

### 2. 個別要素法

#### (1) 概要<sup>1)</sup>

個別要素法は、剛体の球形要素を基本形としており、



(a) 外観 (b) 内観

写真-1 老朽化したRC構造物の崩壊

要素間の接触時に発生するばね力（接触力）を算出し、時々刻々と運動方程式を解くことで、運動を追跡するものである。そのため、通常、要素間にはばねが存在しないが、要素間の接触判定を行い、接触しているならば仮想のばねが発生して得られた接触力から要素同士の不釣合いな力関係によって動的解析を行うものである。

#### (2) 接触ばねと連結ばね

通常の個別要素法は、「接触ばね」と呼ばれるモデルを用いており、圧縮方向にのみ接触力を解くものであるが、本解析におけるRC構造物のような建物をモデル化するときは、引張方向の力も必要になるため、あらかじめ要素間にはばねを生起させる「連結ばね」を用いる<sup>2)</sup>。

ここで「接触ばね」と「連結ばね」の異なる点を整理

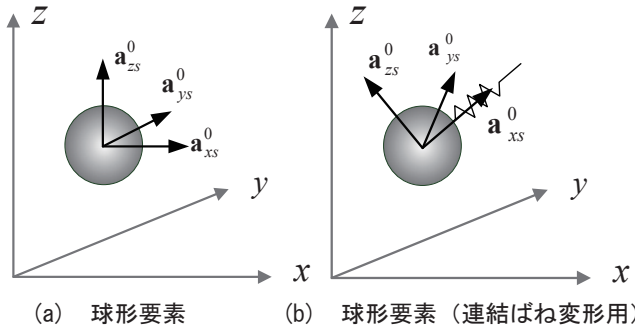


図-1 要素の初期姿勢マトリクス

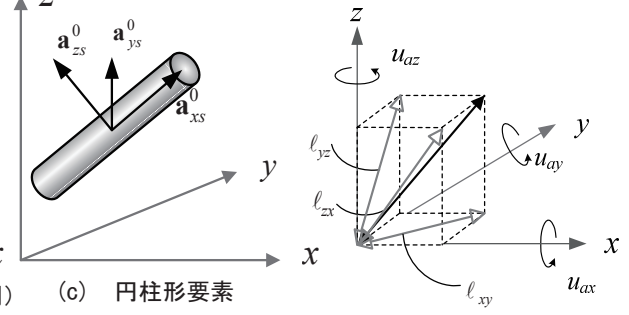


図-2 姿勢マトリクスの更新

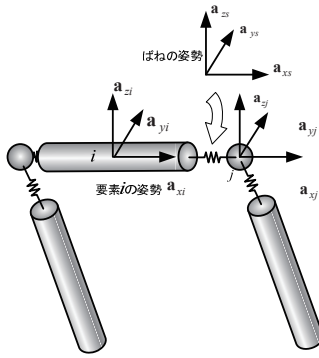


図-3 構造モデル

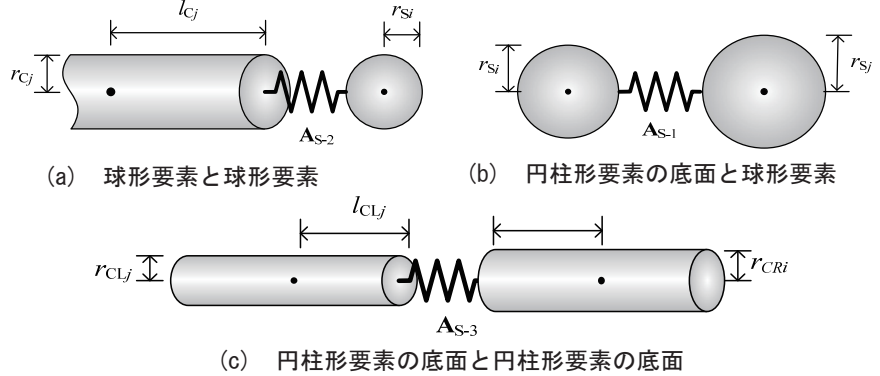


図-4 連結ばねの姿勢

すると、大きく 2 点ある。1 点目は、「接触ばね」において接触判定によって接触と判定された場合に要素間ばねが設定される。一方、「連結ばね」においてあらかじめ要素間ばねを設定する要素の組み合わせを指定し、その組み合わせは計算中固定される。2 点目は、「接触ばね」において剛体要素の組み合わせと位置関係から作用点の位置と向きを時々刻々計算している。一方、「連結ばね」において作用点の位置は計算開始時から要素上の 1 点に固定されるため、作用点の位置もしくはばねの向きを時々刻々計算することである。

### (3) 要素の変位と姿勢

球形要素は、図-1 (a) に示す全体座標系と平行する局所ベクトルを有する。図-1 (b) に示す球形要素に連結ばねがある場合には、連結ばねの方向を局所の  $x$  方向として、全体座標系の  $xy$  平面に平行する局所の  $y$  方向ベクトルを有する姿勢マトリクスを用いる。このとき、各時刻における姿勢マトリクスには次の関係が成り立っている。

$$\mathbf{A}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{zs}^T \\ \mathbf{a}_{ys}^T \\ \mathbf{a}_{xs}^T \end{bmatrix} = \mathbf{T}_s \mathbf{A} \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{A}_s$ ：球形要素の連結ばねに対応する姿勢マトリクス、 $\mathbf{T}_s$ ：球形要素の基本となる姿勢マトリクス  $\mathbf{A}$  から  $\mathbf{A}_s$  への座標変換マトリクス、 $\mathbf{a}_{xs}, \mathbf{a}_{ys}, \mathbf{a}_{zs}$ ： $\mathbf{A}_s$  の  $x, y, z$  軸方向ベクトルである。

一方、円柱形要素では図-1 (c) に示すように、円柱の中心軸に沿って局所の  $x$  方向座標を与え、全体座標の  $xy$  平面と平行な  $y$  方向座標を有する初期の姿勢マトリクスを与える。

本研究の解析基本式の運動方程式より、

$$\mathbf{u}(t + \Delta t) = \mathbf{M}^{-1} \left\{ \mathbf{f}_{ex}(t) - \sum \mathbf{f}_D(\dot{\mathbf{u}}(t)) - \sum \mathbf{f}_K(\mathbf{u}(t)) \right\} \Delta t^2 + 2\mathbf{u}(t) - \mathbf{u}(t - \Delta t) \quad (2)$$

式(2)における  $\mathbf{f}_K, \mathbf{f}_D$  の算出には、時々刻々と変化する要素の姿勢を反映した座標変換を行う必要がある。

ばねの姿勢マトリクスは、時刻歴ごとに変化する。ここでは、連結ばねの姿勢の更新は図-2 を参照して、以下のような近似解によって求めるものとした。

$$\begin{aligned} x_{ax}(t + \Delta t) &= l_{xy} \cdot \cos \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{y_{ax}}{x_{ax}} \right) + \Delta u_{ax} \right\} + l_{zx} \cdot \sin \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{z_{ax}}{x_{ax}} \right) + \Delta u_{ax} \right\} + x_{ax}(t) \\ y_{ax}(t + \Delta t) &= l_{yz} \cdot \cos \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{z_{ax}}{y_{ax}} \right) + \Delta u_{ax} \right\} + l_{xy} \cdot \sin \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{y_{ax}}{x_{ax}} \right) + \Delta u_{ax} \right\} + y_{ax}(t) \quad (3) \\ z_{ax}(t + \Delta t) &= l_{zx} \cdot \cos \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{x_{ax}}{z_{ax}} \right) + \Delta u_{ax} \right\} + l_{yz} \cdot \sin \left\{ \tan^{-1} \left( \frac{z_{ax}}{y_{ax}} \right) + \Delta u_{ax} \right\} + z_{ax}(t) \end{aligned}$$

ここで、 $l_{xy}, l_{yz}, l_{zx}$ ：図-2 に示す時刻  $t$  における  $\mathbf{a}_x$  ベクトルのそれぞれ  $xy, yz, zx$  平面への投影長さ、 $x_{ax}, y_{ax}, z_{ax}$ ：それぞれ時刻  $t$  における  $\mathbf{a}_x$  の  $x, y, z$  方向成分、 $\Delta u_{ax}, \Delta u_{ay}, \Delta u_{az}$ ：それぞれ  $t$  からの増分時間  $\Delta t$  間の回転角ベクトル  $\mathbf{u}_a$  の増分量  $x, y, z$  成分である。

### (4) 要素間ばねとばね力

#### (a) 力のつり合い

図-3 のような構造モデルより、球形要素と円柱形要素の連結ばねにおける力のつり合いについて示す。ここでは、図-5 (a) に示す球形要素同士の連結ばねは圧縮力の作用方向（軸方向）を  $x$  軸方向とし、図-5 (b), (c) に示す。円柱形要素の底面と球形要素もしくは、円柱形要素同士の連結ばねは円柱の長軸方向を  $x$  軸方向とする。そこで、図-5 に示すように要素上の作用点の位置を考慮した連結ばねの局所座標系において力のつり合い式を求めるものとし、ばね力を次のように座標変換する。

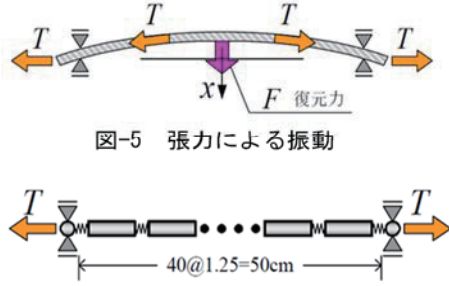


図-5 張力による振動

図-6 解析モデル

$$\tilde{\mathbf{S}}_n = \mathbf{T}_{ns} \mathbf{S}_c \quad (4)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{S}}_n$  : 要素の姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_n$  に従う局所座標系におけるばねの内力ベクトル、 $\mathbf{S}_c$  : 連結ばねの内力ベクトル、 $\mathbf{T}_{ns}$  : 連結ばねの姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_s$  から  $n=L$  または  $n=R$  とする要素の姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_n$  へと変換する座標変換マトリクスであり、次式で示す。

$$\mathbf{T}_{ns} = \mathbf{A}_n \mathbf{A}_s^T = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{xn}^T & \mathbf{a}_{xs}^T \\ \mathbf{a}_{yn}^T & \mathbf{a}_{ys}^T \\ \mathbf{a}_{zn}^T & \mathbf{a}_{zs}^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{a}_{xn}^T \mathbf{a}_{xs} & \mathbf{a}_{xn}^T \mathbf{a}_{ys} & \mathbf{a}_{xn}^T \mathbf{a}_{zs} \\ \mathbf{a}_{yn}^T \mathbf{a}_{xs} & \mathbf{a}_{yn}^T \mathbf{a}_{ys} & \mathbf{a}_{yn}^T \mathbf{a}_{zs} \\ \mathbf{a}_{zn}^T \mathbf{a}_{xs} & \mathbf{a}_{zn}^T \mathbf{a}_{ys} & \mathbf{a}_{zn}^T \mathbf{a}_{zs} \end{bmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $\mathbf{a}_{xn}, \mathbf{a}_{yn}, \mathbf{a}_{zn}$  :  $n=L$  または  $n=R$  とする要素の姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_n$  を構成する各単位座標軸ベクトル。

姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_n$  に従う局所座標系における力のつり合い条件式は次のようになる。

$$\tilde{\mathbf{f}}_L = \tilde{\mathbf{C}}_L^T \tilde{\mathbf{S}}_L \quad (6-a)$$

$$\tilde{\mathbf{f}}_R = \tilde{\mathbf{C}}_R^T \tilde{\mathbf{S}}_R \quad (6-b)$$

ここで、 $\tilde{\mathbf{f}}_L, \tilde{\mathbf{f}}_R$  : それぞれ左右の要素の局所座標系における姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_n$  に従う重心点における外力ベクトル、 $\tilde{\mathbf{S}}_L, \tilde{\mathbf{S}}_R$  : 姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_n$  に従う作用点におけるばねの内力ベクトル、 $\tilde{\mathbf{C}}_L^T, \tilde{\mathbf{C}}_R^T$  :  $\tilde{\mathbf{f}}_L$  と  $\tilde{\mathbf{S}}_L$ 、 $\tilde{\mathbf{f}}_R$  と  $\tilde{\mathbf{S}}_R$  を関係付ける局所のつり合いマトリクスである。

さらに、局所座標系の  $\tilde{\mathbf{f}}_L, \tilde{\mathbf{f}}_R$  は、全体座標系へと変換され、次式のようになる。

$$\mathbf{f}_{Kn} = \mathbf{T}_{Gn} \tilde{\mathbf{f}}_n \quad (7)$$

ここで、 $\mathbf{f}_{Kn}$  : 全体座標系における要素  $n$  の重心点に働く外力ベクトル、 $\tilde{\mathbf{f}}_n$  : 要素  $n$  の姿勢マトリクス  $\mathbf{A}_n$  に従う重心点における外力ベクトル、 $\mathbf{T}_{Gn}$  :  $n=L$  または  $n=R$  に対応する局所座標系から全体座標系へ変換する座標変換マトリクスであり、次式によって与えられる。

$$\mathbf{T}_{Gn} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_G^T \mathbf{a}_{xn} & \mathbf{x}_G^T \mathbf{a}_{yn} & \mathbf{x}_G^T \mathbf{a}_{zn} \\ \mathbf{y}_G^T \mathbf{a}_{xn} & \mathbf{y}_G^T \mathbf{a}_{yn} & \mathbf{y}_G^T \mathbf{a}_{zn} \\ \mathbf{z}_G^T \mathbf{a}_{xn} & \mathbf{z}_G^T \mathbf{a}_{yn} & \mathbf{z}_G^T \mathbf{a}_{zn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

ここで、 $\mathbf{X}_G, \mathbf{Y}_G, \mathbf{Z}_G$  : 全体座標系の単位座標軸ベクトル。  
式(4)~(8)の手続きをまとめると、次式のようになる。

$$\mathbf{f}_{Kn} = \mathbf{T}_{Gn} \tilde{\mathbf{C}}_n^T \mathbf{T}_{ns} \mathbf{S}_c \quad (9)$$

### (b) 変形適合条件

つり合いマトリクスと変形適合マトリクスが転置関係となる反傾関係が成立するので、変形適合条件式は次式によって与えられる。

$$\Delta \mathbf{q}_j = \sum_{i=1}^2 \mathbf{T}_{nsi}^T \tilde{\mathbf{C}}_{ij}^T \mathbf{T}_{Gni}^T \Delta \mathbf{u}_i \quad (10)$$

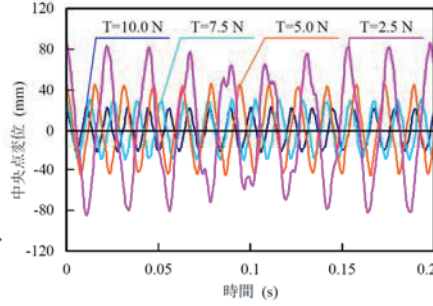


図-7 弦の振動

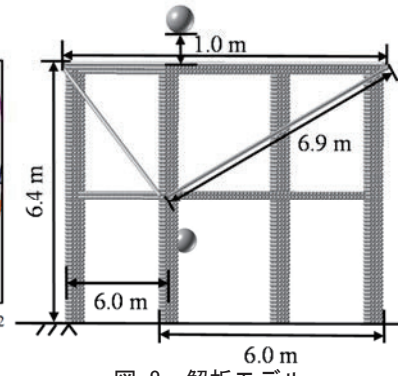


図-8 解析モデル

ここで、 $\Delta \mathbf{q}_j$  : 連結ばね  $j$  の増分変形量、 $\tilde{\mathbf{C}}_{ij}$  : 変形適合マトリクス、 $\Delta \mathbf{u}_i$  : 連結ばね  $j$  に連結する要素の増分変位ベクトルである。

### (5) 検定解析

提案手法である個別要素法解析は、ワイヤロープのような柔性構造物に対する検討されたものである。そのため、基本的には、大変形に伴う軸力による曲げ変形の復元力が動的応答に与える影響について解析できるものである。そこで、簡単な検定例として弦の振動に及ぼす張力の影響を検討する。

ここでは、曲げ剛性の小さい線状の構造では、図-5に示すように軸力が曲率に応じて曲げ変形方向の復元力を与える。その典型的な問題として弦の振動があり、弦の振動数は次式によって与えられる。

$$f_{nq} = \frac{1}{2d} \sqrt{\frac{T}{\rho d}} \quad (11)$$

ここで、 $f_{nq}$  : 弦の基準振動数、 $d$  : 弦の長さ、 $T$  : 弦の張力、 $\rho d$  : 弦の線密度。

そこで、長さ50 cm、直径0.2 mmの鋼線を図-6に示すように円柱形要素40個を用いた場合の弦の振動を解析した。なお、弦の中央部に鉛直方向1.0 Nの外力と力の釣合う変位を初期状態として与え、鉛直方向の力を解放することにより弦を振動させた。図-7に弦の中央点変位~時間関係を示す。数値積分誤差の影響と思われる乱れが生じ、完全な正弦波形状を示すことができないものの、概して良い周期性を示している。その応答は、張力が大きくなると振幅が小さくなり、振動数が増加し、周期が短くなっている。なお、 $T=2.5$  Nのように弦の変位が大きいと、滑らかな正弦波が得られない。この点については、姿勢マトリクスの処理等における数値誤差が蓄積されるため、構造の対称性がわずかに崩れるためであると考えられる。

## 3. 解析の概要

### (1) 解析モデル

図-8に、解析モデルを示す。これは、高さ6.4 m×幅6.0 m×奥行6.0 mの2層1スパンのRC構造物をモデル化している。柱部材は0.1 mの直径の球形要素を0.4 mの正方形に16要素配置して、2層を6.4 mの一本の柱としている(1024要素/柱1本)。また、梁部材は、6.0 mに0.1 mの球形を連結ばねで連結してモデル化している。床の部材

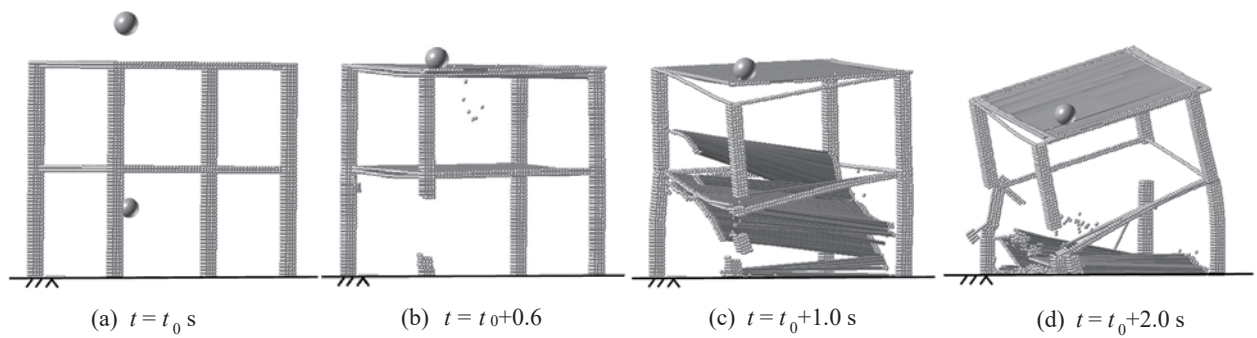


図-9 引張材を有さないモデル

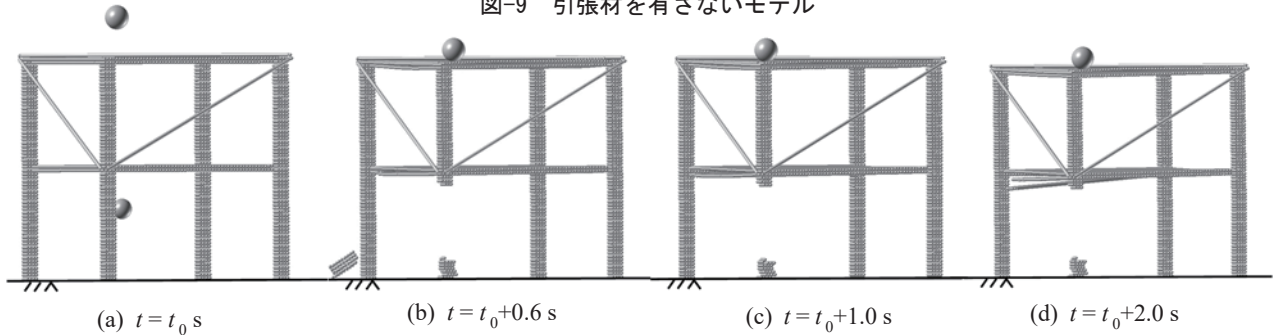


図-10 引張材を有するモデル

は円柱形要素でモデル化して、球形要素と連結させている。また、本解析では、柱部材の下端の要素に20 m/sの球形要素（鉄製の重錘をモデル化）を衝突させて、柱を失われた時の建物を生起させている。この状態で、建物が安定状態であることを確認し、上方1.0 mから重錘モデル（重さ300 kg）を落下させて、建物の耐力を確認する。一方、補強ケーブルを考え、引張材モデルとして、6.9 mの長さの円柱形要素と球形要素でモデル化している。

## (2) 解析例

本解析において、引張材を有さないモデルと引張材を有するモデルの2つの解析例を基に、引張材の有用性を検討する。また、解析初期値はRC構造物の強度から推定したものをそのまま用いている。引張材は、補強ケーブルをモデル化しているので文献2)を参考とした。

## 4. シミュレーション結果

図-9は、引張材を有さない解析である。図-9(a)は、解析時の初期位置を示している。柱を一つ失わせるために、重錘モデルを衝突させて柱を破壊させる。次に、図-9(b)は上方から落下させる重錘が建物に衝突したときである。柱を失ったことで建物が傾いていることがわかる。図-9(c)は、重錘の荷重によって奥行の部材が壊れていき、梁と床部分が大きく壊れている。さらに、図-9(d)は柱部材が明瞭に破壊されている。この後、時間が経過するにつれて建物は破壊の過程に至り形状を保てなくなる。

図-10は、引張材を有しているモデルである。図-10(a)は、解析時の初期位置を示している。図-10(b)は、柱を失った状態であるが、建物としては安定状態になっている。これは、引張材の効果によって失った耐力を他の部材が補えるものと考えられる。さらに、図-10(c)は

奥行の床の部分が破損しているが、それ以外は破損部分が見られなかった。さらに、図-10(d)まで解析を行っても構造全体が破壊に至る結果にはならなかった。つまり、本解析例において引張材を入れることで、建物の耐力に効果を発揮したことを示している。

これは、個別要素法解析によって3次元的に可視化できることから、局所の破損部分を確認することができることが期待される。

## 5. 結言

本研究は、柱を失った不安定状態にある建物に対して引張材を使用することで応急安定化対策としての有用性を検討した。

- (1)個別要素法における連結ばねモデルの概要について示し、柔性構造物の適用性を示した。
- (2)個別要素法解析によって、不安定な建物をモデル化させて、崩壊過程をシミュレートすることができた。
- (3)最上段に荷重をかけて崩壊に至る構造モデルに対して、簡易的に引張材を応急的に配置することで、崩壊せずに建物の形状を維持できることがわかった。

本研究では、簡単なモデル例題としているため、実際の建物の崩壊との摺り合わせが必要である。しかし、このようなシミュレーションで可視化することで、崩壊を未然に防ぐことの援用手法として期待できる。

## 参考文献

- 1) Cundall, P. A. : A computer model for simulating progressive large scale movement in blocky rock system, *Proc. Symp. ISRM Nancy France*, Vol.2, pp.129-136, 1971.
- 2) 原木大輔, 香月智, 田代元司: 円柱形要素を用いた個別要素法による落石防護網の衝撃応答解析, *土木学会論文集 A*, Vol.65, No.2, pp.536-552, 2009.6.